

"Es ist unsere Aufgabe, nicht nur die Wahrheit festzustellen, sondern auch die Ursache des Irrtums, denn dies trägt dazu bei, daß eine feste Überzeugung entsteht." (Aristoteles)

Vorwort

Zentrale Frage zum Verständnis des Nervensystems ist dessen Unstetigkeit: Ist ein Impuls zu einem Zeitpunkt an einem Ort, so ist er einen Zeitpunkt später an einem völlig anderen. Allein über das Corpus Callosum sollen 4 Milliarden Impulse pro Sekunde fließen. Weder sind stabile Zyklen, noch verlässliche Initiali annehmbar.

Entgegen einer in der Neuroinformatik weit verbreiteten Annahme existieren für ein Hodgkin/Huxley-Neuron [8] keine statistischen Verknüpfungen von Information – dafür aber sehr wohl reale, interferenzielle: Nur wenn viele Impulsspitzen *gleichzeitig* an ein und demselben Neuron eintreffen, bewirken sie Erregung und Weiterverarbeitung.

Was aber bedeutet Gleichzeitigkeit für ein Netzwerk? Welche Wirk- und Funktionsprinzipien ergeben sich daraus zwangsläufig? Diese Fragen beschäftigen mich seit 1992/93 [6].

Zaghft können erste Antworten riskiert werden, die alle mit *Wellen-Interferenz in Netzwerken* zu tun haben. Wir finden uns unmittelbar auf dem Terrain von *Orts- und Zeitfunktionen* und deren ein- und mehrdimensionalen Bewegungsformen – genannt *Wellen* – auf *Leitbahnen ionischer Art* wieder.

Was ist an denen so bedeutsam? Nervlich-ionische Leitbahnen haben gegenüber elektrischen eine millionenfach verminderte Leitgeschwindigkeit. Typisch reicht diese von Mikrometern bis zu Zentimetern pro Sekunde. Spitzenwerte sehr dicker Axonen liegen um einen Meter pro Sekunde.

Dagegen breiten sich elektrische, von Elektronen getragene Wellen sehr viel schneller aus. In feuchter

Umgebung (Haut, Muskeln, Fett, Nerv) breiten sich diese nahe der Lichtgeschwindigkeit aus.

I.

Jeder Student der Physik hat sicher die Verlegenheit kennengelernt, die entsteht, wenn bei der Diskussion der Faltung (des Faltungsintegrals) darauf hingewiesen wird, daß anstelle einer Multiplikation zweier Zeitfunktionen hier andere Regeln gelten. Die Faltung sei nicht zu verwechseln mit der gewöhnlichen Multiplikation von Zeitfunktionen. Man multipliziere in Scilab zwei Zeitfunktionen und wundere sich über die quadratische Ergebnismatrix [1x1] oder [nxn]. In der Feldtheorie fanden Euler, Fourier und Laplace, daß man sich nicht länger mit Zeitfunktionen beschäftigen müsse: Man wechsele einfach in den Frequenzbereich. Resultierende Frequenzfunktionen lassen sich hier ganz gewöhnlich multiplizieren. Vorbei ist der Ärger mit der Faltung.

Während unsere Wellen Sample für Sample zu multiplizieren (oder zu addieren) sind (mit Punkt Stern), ist die Faltung eine Ausmultiplikation jedes mit jedem Sample. Wenn wir an die direkte Hardwareumsetzung der Faltung als FIR (Finite Impulse Response) Filter denken, wird klar, daß eine Faltung nur als ein Interferenz-Netzwerk (IN), nicht aber mit *einem* Knoten eines IN beschrieben werden kann. Die hereinkommende Zeitfunktion wird beim FIR durch Einheitsdelays verzögert. Entsprechend der Regel, daß in IN keine Information mit unendlicher Geschwindigkeit übertragen werden darf, haben wir die Delay-Struktur adäquat ins IN zu übertragen.

Die Verunsicherung geht weiter bei bewegten, eindimensionalen Zeitfunktionen. Sei vt der Bewegungsparameter und x die Ordinate, so wird die Ortswelle bestimmt durch $f(vt-x)$, deren Negierte aber ist $f(vt+x)$. Sicher kennen auch Sie nur die weit verbreiteten, falschen Formen $f(x-vt)$ oder $f(x+vt)$ nach Abb.1? Schauen Sie genau hin!

Erst recht ist man verunsichert, wenn man bedenkt, dass wenigstens zwei Faltungskerne bekannt sind: Neben dem bekannten Faltungskern (Abb.1C)

$$g(t) * h(T-t)$$

mit $T = x/v$ existiert auch noch ein entgegengesetzter Kern der Faltung (analog Abb.1D)

$$g(t) * h(-T-t).$$

Von der klassischen Mathematik blieb dieses Vorzeichen bis heute eher unbeachtet, siehe Wikipedia „Faltung“. Als Physiker aber haben wir es im anderen Fall mit Zeitumkehr zu tun. Unbemerkt wird es hier wieder mathematisch interessant: Die Zeitumkehr gestattet wesentlich elegantere Inversionsmethoden als der Vorwärtslauf (Thema: Rekonstruktion contra Projektion).

Um es vorwegzunehmen: Interferenz von Wellen z.B. im Nervensystem ist nicht Faltung, sondern simple, gliedweise Verknüpfung (Multiplikation oder Addition) von Zeitfunktionen, sozusagen eine einelementige Faltungsintegration von n Zeitfunktionen. Sämtliche Zeitfunktionen haben einen Zeitparameter, sie laufen. Faltung hingegen passiert an zu durchdringenden Wänden oder in Filtern, dabei „steht eine Welle“.

In der Welt der Interferenznetze ordnen sich die Dinge kausal. Oder auch nicht, wenn wir die akustische Kamera als erstes scheinbar nichtkausales System betrachten mögen: die Antwort scheint bereits da zu sein, bevor die Frage gestellt wurde. Hier werden negative Verzögerungen $f(t+T)$ benutzt, um die Signale zu rekonstruieren.

II.

Als ich 1992 auf spiegelverkehrte Kartierungen in pulspropagierenden ("neuronalen") Netzwerken stieß, erregte diese Entdeckung gemischte Gefühle.

Hatte eine riesige Neuronale- Netzwerk- Gemeinde in vierzig Jahren intensiver Forschung mit zehntausenden Aufsätzen und zigtausenden Büchern (bis auf Jeffress [5]) nichts dergleichen bemerkt?

Als kurz danach (im August 1994) das erste, rüdicke akustische Standbild geboren war, war das wiederum eine Überraschung. Gab es so etwas schon? Wie ist es möglich, dass der gesunde Menschenverstand Dinge erreichte, die Spezialisten verborgen blieben?

Die entscheidende Frage aber wurde: was ist am IN-Ansatz eigentlich anders? Was ist problematisch an klassischen Ansätzen? Was hat der IN-Ansatz voraus, wenn damit erste akustische Standbilder [1] und erste akustische Filme gelingen? Ist es unsere Unsicherheit im Umgang mit Zeitfunktionen im Wechselspiel zwischen Zeit und Raum, die auf

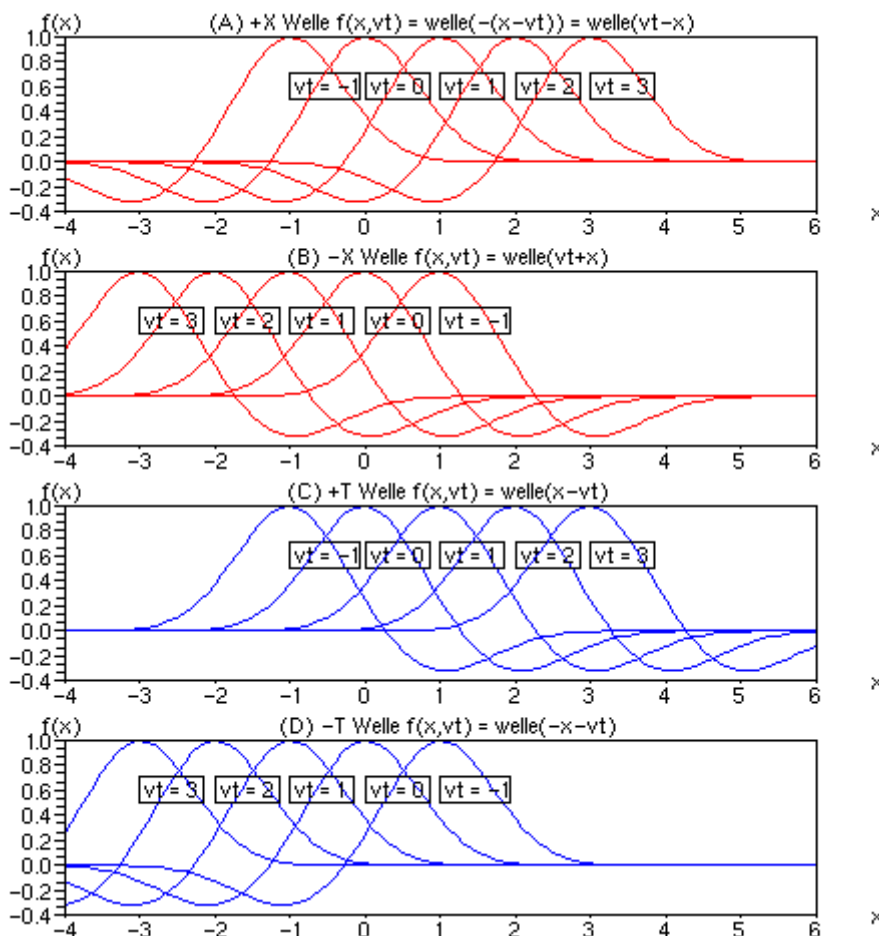


Abb.1:
Vier Elementarwellen.
Doppel- Gauß- Welle als
parametrisierte
Zeitfunktion.

Vier verschiedene Wellen
mit Schweif, von denen wir
zumindest drei kennen.

(A) nach rechts laufende
Welle

(B) nach links laufende
Welle

(C) nach rechts rückwärts
laufende Welle
(Faltungskern)

(D) nach links rückwärts
laufende Welle
(Unbekannter
Faltungskern)

© G. Heinz, siehe Anlage

beiden Fachgebieten (Neuroscience und Akustik) den Erkenntnisfortschritt blockierten? Sollten vielleicht auch noch andere Fachgebiete betroffen sein? Haben wir es etwa mit einem Fundamentalproblem noch nicht verstandener, klassischer Feldtheorie zu tun? Meine persönliche Vermutung war seinerzeit, daß es einerseits die allgemeine Unsicherheit im Umgang mit Zeitfunktionen und andererseits die Gewohnheiten der klassisch einkanalen Physik waren, die diese sogleich zwischen die Mühlsteine der Fourier-Transformation trieb.

Nur formal sind Zeit- und Frequenzbereich ineinander transformierbar. Spektrale Darstellungen fußen auf dem Bereich der komplexen Zahlen. Mit Einheitskreis und dessen Imaginär- und Realteil sind Phasenverschiebungen zwischen 0° und 360° beschreibbar. Betrachtet man Wellen mit im Vergleich zur Messapparatur kurzer Wellenlänge, so werden die Phasenwinkel aller Wellen gleichbehandelt, 30° der ersten Welle ist identisch zu 30° aller anderen Wellen. Hundert Millisekunden im Zeitbereich sind viele Fourier-Wellen zugeordnet: gleich, welche Frequenz ($f > 2/T$) man wählt, so findet man a) für die 100 ms einen Phasenwinkel (logo) und b) man findet diesen Phasenwinkel in jedem vorhergehenden Umlauf wieder. (Man erinnere sich dabei auch an die Fourier-Transformierte der Sprungfunktion und des Stoßes). So entstehen beim Übergang in den Bereich der komplexen Zahlen Mehrdeutigkeiten, die den Interferenzabbildungen nicht gut tun. Es entstehen zusätzliche Scheinerregungen und Bildfehler (Aliasing), sobald wir die Krücke 'Wellenzahl' weglassen.

(Den Umgang mit einem Notnagel, die Erweiterung des Fourier-Bereiches mittels Kreis-Wellenzahl kennen nur wenige Ingenieure - dessen Anwendung aber entscheidet über richtige oder falsche Modellierung von Interferenzsystemen im Frequenzbereich, da bei variablen Bandbreiten stets Verzögerungen über mehrere Wellenzüge zu beachten sind.)

Pulswellen, die das Verständnis für Interferenz überhaupt erst erschließen, sind als Signalfom im Frequenzbereich ganz und gar ausgeschlossen.

Denkt man nun aber im Zeitbereich, wird andererseits die intime Nähe zur Feldtheorie in einer ungeheuerlichen Erkenntnis transparent: Zeitfunktion und Welle sind identisch, eine sich bewegende Zeitfunktion ist eine Welle - und das im

anschaulichen, wie im mathematisch-physikalischen Sinne.

Systemtheorie und Feldtheorie sind nicht nur miteinander verquickt, sie sind an dieser Stelle identisch. Interferenznetzwerke sind nur der Schlüssel zum Verständnis, die Eselsbrücke, über die die Parallelen aufgelöst werden können.

Sollte uns noch ein Rest Unbehagen quälen: Numerische, diskrete Modellierung der Netze (und deshalb schließlich die Prägung Interferenz-Netze) ist der ebenfalls numerischen Simulation von Feldern identisch, sofern beide auf atomarem Level aus Knoten und Kanten bestehen. Nun könnte ein Leibnitz oder Newton daherkommen und sagen: "Ich habe doch damals die Infinitesimalrechnung erfunden - warum machen wir die Maschen nicht fein genug?" Nun wir können tatsächlich. Dann würden wir die Interferenznetze einfach Feldtheorie oder FEM nennen. Allerdings geht dabei deren Verständnis auch gegen Epsilon. Der Begriff Interferenznetzwerk hat also auch etwas mit Pädagogik zu tun. Je gröber die Dinger geschnitzt sind, desto einfacher verstehen wir das Problem. Eindimensionale Interferenznetze heißen zum Beispiel Regelkreis, elektrische Masche oder Zusammenstoß (den kann man auch damit modellieren). Bis dahin ist der menschliche Verstand schon vorgedrungen.

Über die Rückführbarkeit aller Integraltransformationen (Fourier-, Laplace-, Gabor-, Wavelet-Transformation, Faltung, Korrelationen...) auf Interferenznetze und I.-integrale der einfachsten Art mit zwei unvollständigen Zeitfunktionen schließt sich dieser Kreis, wir sind wieder im 'Frequenzbereich' angekommen.

Wir bemerken plötzlich, daß es auch Integraltransformationen mit mehr als zwei Variablen geben müßte: Wir brauchen dafür nur - genau, die Interferenznetzwerke.

Um aber Interferenzen inhaltlich zu verstehen, sollte man lernen, 'im Zeitbereich' zu denken: komplexe Zahlen sind für Wellenfelder oft nicht anwendbar, Fourier-Transformation, Gabor-Transformation oder Euler-Formel ade.

III.

Die Entwicklung der Theorie neuronaler Netzwerke (Neural Networks, NN) stand 1943 durch einen

Aufsatz von McCulloch und Pitts [2] an einem Scheideweg [3].

Zeitfunktionen werden dort auf einer ganzzahligen Zeitachse miteinander verknüpft. Leitbahnen werden als elektrische Knoten betrachtet. Die Autoren schreiben Zeitfunktionen etwa in der Form $N(t - 1)$ oder $N(t - 2)$ etc., man impliziert ganzzahlige Zustände. Durch logische Gatter oder Verzögerungsglieder werden die Zeitfunktionen oder Zustände verändert.

In Kombination mit dem genau zweihundertvierzig Jahre zuvor entstandenen Leibnizschen Binärsystem [10] – später als Boole'schen Algebra [4] bezeichnet, entsteht daraus zwischen 1950 und 1980 die Digitaltechnik, ohne die Mikroprozessoren, das Internet oder die digitale Signalverarbeitung undenkbar wären.

„Zu Beginn des ersten Tages war die 1, das heißt Gott. Zu Beginn des zweiten Tages die 2, denn Himmel und Erde wurden während des ersten geschaffen. Schließlich zu Beginn des siebenten Tages war schon alles da; deshalb ist der letzte Tag der vollkommenste und der Sabbat, denn an ihm ist alles geschaffen und erfüllt, und deshalb schreibt sich die sieben als 111, also ohne Null. Und nur wenn man die Zahlen bloß mit 0 und 1 schreibt, erkennt man die Vollkommenheit des siebenten Tages, der als heilig gilt, und von dem noch bemerkenswert ist, dass seine Charaktere einen Bezug zur Dreifaltigkeit haben.“
Gottfried Leibniz

Aber diese Sichtweise dominiert in Folgejahren auch die Forschung zu neuronalen Netzwerken in allen Bereichen. Pattern- Learning ist angesagt, Amari's ‚Pool of Neurons‘ Modelle [7] erleben eine Blütezeit, die unbeachtet der Heinz'schen IN bis Ende der Neunziger unvermindert anhält.

Gegen die Zustandsmaschinen stellt Jeffress [5] 1948 - genau einhundert Jahre nach Boole - ein erstes Interferenzmodell eines nervlichen Netzwerkes, welches zwei gegeneinander auf Leitbahnen fließende Zeitfunktionen betrachtet. Jeffress Leitbahnen haben die Funktion von Laufzeitleitungen. Aber eigentlich hatte 1894 schon Sigmund Exner [9] den Interferenzkreis erfunden.

Durch präzise Laufzeitmodellierung entstehen völlig andere, neue Eigenschaften: das Netzwerk kartiert spiegelverkehrt. Jeffress bemerkte vielleicht noch nicht die Brisanz seiner Entdeckung, er wird im Schatten von McCulloch/Pitts fast vergessen.

Von ihm wird eine Schallquelle von links nach rechts in das Gehirn abgebildet, eine Schallquelle von rechts wird links im Gehirn abgebildet. Dieses Herangehen wurde lange vernachlässigt, die digitale

Welt der Logik (Boolesche Algebra) und Zustandsmaschinen (Finite State- Machines) prägte vierzig Jahre lang auch die Welt der Forschungen zu Nervennetzen.

1993 entstand eine Untersuchung zu Eigenschaften von Netzwerken mit verteilten Laufzeitleitungen unter dem Titel 'Neuronale Interferenzen' [6]. Dabei kamen weitere, neue Eigenschaften zum Vorschein. Da immer wieder Verwechslungen mit künstlich-neuronalen Netzen auftraten, werden diese Netzwerke seit einigen Jahren als Interferenznetzwerke bezeichnet.

Betrachten wir das langsame Kriechen von nadelscharfen Impulsen im Nervensystem, so ist dieser Ansatz für nervliche Modellierungen geeignet.

Im Vergleich zur Zustandsbetrachtung (Pattern-Propagation) besitzt ein sonst identisches Netzwerk ganz andere Eigenschaften. Dadurch setzt sich wohl die neue Sichtweise nur langsam durch.

Interferenznetzwerke schließen die Modellierung von Leitbahnen mit unendlich hoher Geschwindigkeit (Knotenapproximation) sowie die Modellierung von Verzögerungselementen nicht aus. Entsprechend kann man künstliche, neuronale Netzwerke oder digitale Filter als spezifische Interferenznetzwerke mit diskretisierter Zeitstruktur ansehen. Die Diskretisierung allerdings ändert die Eigenschaften dieser Netzwerke fundamental.

IV.

Zurück zum Ausgangspunkt, zurück zur Faltung.

Betrachten wir die Faltung, oder andere Integraltransformationen, wie Laplace-, Fourier-, Wavelet- oder wie Kreuz- und Autokorrelation als spezielle Interferenznetze zweier verknüpfter Zeitfunktionen in Analogie zum Finite- Impulse-Response (FIR) -Filter, so wird das große Potential deutlich, welches nervliche Informationsverarbeitung besitzt. Ein einziges Pyramidenzellneuron verknüpft siebentausend bewegte und verschobene Zeitfunktionen!

Modellieren wir zum Beispiel mit einem Interferenznetzwerk die Fouriertransformation, so wird deutlich, dass jedes einfachste, neuronale Netzwerk Klänge oder Laute unterscheiden kann.

Eine erste Applikation von Interferenznetzen, die akustische Kamera, sollte ursprünglich nur die

Einigkeit von Hören und Sehen im Nervensystem demonstrieren. Sie *hört* Zeitfunktionen und gibt Bilder aus. Das provoziert die Frage, ob sie sieht oder hört?

Unsere Augen *hören* elektromagnetische Signale im Frequenzband zwischen 450 und 750 THz (Terahertz, 10^{12} Hz).

Unser Cortex *hört* Berührungen, *hört* die Augen, *hört* die Nase oder *hört* die Ohren: Im Nervensystem gibt es zunächst nur Zeitfunktionen, bevor daraus Interferenzintegrale (Bilder & Karten) werden. Die Nervenzelle kann nicht entscheiden, woher ein Input kommt. Erst dieses Elementarverständnis – welches über Interferenznetze vermittelt wird, gestattet uns eigentlich, mit Neuroforschung zu beginnen.

Aus Sicht von Interferenznetzen verschmelzen Hören und Sehen miteinander, egal, ob die akustische Kamera oder ein optisches Linsensystem betrachtet wird. Der Schlüssel - das Bild - heißt bei Heinz ganz simpel Interferenzintegral über Wellenfelder von Zeitfunktionen.

Sehen ist also Hören?

Ja! Aber Kanalzahl und Überbestimmtheit definieren ganz spezielle Eigenschaften von Interferenznetzwerken für Sehen und Hören.

Sehkarten brauchen Eigeninterferenz von Wellen bei hohen Kanalzahlen.

Hörkarten brauchen Fremdinterferenz von Wellen bei niedrigen Kanalzahlen.

Eigentlich ist doch alles ganz simpel, oder?

Wie sagte doch Kant: "Anschauungen ohne Begriffe sind blind. Begriffe ohne Anschauungen sind leer."

Referenzen

[1] Brühl, S., Schmitz, K.-P.: Noise Source Localization on Highspeed Trains using Different Array Types. *Internoise1993*, Leuven, Belgium, August 24-26 1993, http://www.gfai.de/~heinz/publications/papers/2005_Wien.pdf

[2] McCulloch, W.S.; Pitts, W.: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5: 115-133 (siehe Anderson/Rosenfeld: *Neurocomputing - Foundations of Research*, MIT-Press, 1988 ff.)

[3] Ein Teil dieses Abschnitts wurde 2006 sinngemäß in die Enzyklopädie www.wikipedia.de "Interferenznetzwerk" gestellt, wurde dort aber mit Löschantrag entfernt.

[4] Boole, George: *The Calculus of Logic*. Cambridge and Dublin Mathematical Journal Vol. III (1848), pp. 183-198

[5] Jeffress, L.A.: A place theory of sound localization. *Journ. Comparative Physiol. Psychol.*, 41, (1948), pp. 35–39

[6] Heinz, G.: *Neuronale Interferenzen*. Autor gleich Herausgeber. 1993, Persönlicher Verteiler, siehe <http://www.gfai.de/~heinz/publications/Nl/index.htm>

[7] Amari, S.-I.: Neural theory of association and concept formation. *Biol. Cybernetics* vol. 26, 1977, pp. 175-185

[8] Hodgkin, L.A., Huxley, A.F.: A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *J.physiol.* (1952) 117, 500-544

[9] Exner, Sigmund: *Entwurf zu einer physiologischen Erklärung der psychischen Erscheinungen von Dr. Sigmund Exner: I. Theil*. Leipzig Wien: F. Deuticke (1894)

[10] Leibniz, Gottfried: *Explication de l'Arithmétique Binaire*, 1703/1705. *Memoires de l'Academie Royale*.

Impressum

Source www.gfai.de/~heinz

Mail to heinz@gfai.de

Anlage: Scilab- Quelle für Abb.1

(aus DAGA-Vortrag 2007)

```
clear; clf(0); scf(0); x=0; vt=0; // Init
printf("\n\nEindimensionale Zeitfunktionen\nheinz@gfai.de\n\n");
giffile="4wellen_vt.gif"; // Ausgabefile
label=.5; winkel=0; box=1; // Label: Höhe Winkel Box

deff('y=gauss(u)','y=exp(-(u)^2)'); // Scilab-Funktion
deff('z=welle(w)','z=gauss(w)-gauss(w-2)/3'); // mit Schwanz

for vt=-1:1:3; // von:delta:bis Parameter
    // pause // "return" eintippen in Konsole
    x=-4:.1:6; // von:delta:bis Laufvariable

    subplot(411); // Reihen, Spalte, Element
    titel='(A) +X Welle f(x,vt) = welle(-(x-vt)) = welle(vt-x)';
    plot(x,welle(vt-x),'red');
    xstring(vt,label,' vt = '+string(vt)+' ',winkel,box); // Label
    xtitle(titel,'x','f(x)'); // Titel

    subplot(412); // Reihen, Spalte, Element
    titel='(B) -X Welle f(x,vt) = welle(vt+x)';
    plot(x,welle(x+vt),'red');
    xstring(-vt,label,' vt = '+string(vt)+' ',winkel,box); // Label
    xtitle(titel,'x','f(x)'); // Titel

    subplot(413); // Reihen, Spalte, Element
    titel='(C) +T Welle f(x,vt) = welle(x-vt)';
    plot(x,welle(x-vt),'blue');
    xstring(vt,label,' vt = '+string(vt)+' ',winkel,box); // Label
    xtitle(titel,'x','f(x)'); // Titel

    subplot(414); // Reihen, Spalte, Element
    titel='(D) -T Welle f(x,vt) = welle(-x-vt)';
    plot(x,welle(-x-vt),'blue');
    xstring(-vt,label,' vt = '+string(vt)+' ',winkel,box); // Label
    xtitle(titel,'x','f(x)'); // Titel
end;

xselect(); // Fenster on top
xs2gif(0,giffile); // #0 Ausgabe als GIF-File
printf('File als %s ausgegeben\n\n',giffile);
return;
```